

一次散乱理論に基づく散乱係数の空間分布推定法とその適用-2000年鳥取県西武地震の震源域周辺の短波長不均質構造-

著者	浅野 陽一
号	46
学位授与番号	2008
URL	http://hdl.handle.net/10097/39035

氏 名・(本 籍)	あさ の よう いち 浅 野 陽 一
学 位 の 種 類	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2 0 0 8 号
学位授与年月日	平 成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科, 専 攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 地球物理学専攻
学 位 論 文 題 目	一次散乱理論に基づく散乱係数の空間分布推定法とその適用 ー2000年鳥取県西部地震の震源域周辺の短波長不均質構造ー
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 長谷川 昭 教 授 浜 口 博 之, 藤 本 博 巳, 教 授 大 竹 政 和, 佐 藤 春 夫 助教授 海 野 徳 仁

論 文 目 次

第 1 章 序論

- 1-1 短波長不均質構造と地震波散乱に関する従来の研究
- 1-2 地殻不均質構造に関する従来の研究
- 1-3 本研究の目的

第 2 章 一次散乱理論に基づく散乱係数空間分布の推定法

- 2-1 はじめに
- 2-2 一次散乱理論に基づいた S コーダ波の理論エンベロープ合成
- 2-3 速度波形記録を用いた観測エンベロープ合成
- 2-4 観測方程式
- 2-5 非線形インバージョンの線形化
- 2-6 データの重み付け
- 2-7 拘束を導入したモデル推定
- 2-8 まとめ

第 3 章 散乱係数インバージョンの観測データへの適用

- 3-1 はじめに
- 3-2 2000年鳥取県西部地震稠密合同余震観測の概要
- 3-3 解析対象とする地震
- 3-4 震源決定およびメカニズム解の推定
- 3-5 余震観測記録を用いた観測エンベロープの合成
- 3-6 グリッドおよびブロックの配置

3-7 波線に沿った減衰の評価

3-8 初期モデル

第4章 鳥取県西部地震震源域における散乱係数の空間分布

4-1 はじめに

4-2 ヒットカウント

4-3 チェッカーボードレゾリューションテスト

4-4 2000年鳥取県西部地震震源域における散乱係数の空間分布

4-4-1 初期モデルの選択

4-4-2 散乱係数空間分布の特徴

4-5 リストアリングレゾリューションテスト

第5章 散乱係数空間分布に影響を及ぼす系統的な誤差要因

5-1 はじめに

5-2 震源輻射特性の影響

5-3 非等方散乱がおよぼす影響

5-4 多重散乱による影響

5-5 データセットの再選択による散乱係数空間分布

5-6 まとめ

第6章 議論

6-1 散乱係数インバージョンの有用性と今後の課題

6-2 2000年鳥取県西部地震震源域周辺の散乱係数空間分布とその解釈

第7章 結論

参考文献

論文内容要旨

地震波の波長と同程度かそれよりも短い空間スケールでの地震波速度や密度のゆらぎ（以下では、不均質）は、散乱体として振る舞う事が知られている。そのため、地震波走時トモグラフィー等からはその検出が困難な断層破碎帯などのイメージングには、散乱波を使った解析が有効であると期待される。本研究では、微弱な散乱源をも高い空間分解能でイメージングするために、現実的な震源モデルや速度構造モデルの導入が可能な、新しいインバージョン法を開発した。

第1章では、まず、短波長不均質構造と地震波散乱に関するこれまでの研究、特に、輻射伝達理論とその応用による不均質構造の推定法について記述した。続いて、地殻不均質構造に関するこれまでの研究、特に、短波長不均質構造を推定するためのさまざまな解析法を取り上げて紹介した。さらに、本研究の目的を述べるとともに、以下の章における指針を示した。

第2章では、まず、観測された地震波エンベロープから一次散乱理論による減衰を取り除いた後のゆ

らぎをデータとして、相対的な散乱強度の空間分布を推定する従来の手法の問題点を指摘した。つぎに、観測されたエンベロープそのもののフィッティングを行って、モデルパラメータである散乱係数を推定する、新しいインバージョン法を提案した。従来の手法では、上記の減衰の効果を取り除く過程で、空間的になめらかな散乱強度分布に起因するエンベロープの傾きをも取り去ってしまう恐れがある。このような場合には、散乱強度分布を正しく評価することができない。また、取り除くべき減衰の効果を計算するモデルとして、均質速度媒質中での震源の等方輻射と一次等方散乱といった極めて単純化されたモデル以外は導入することが困難であるという問題点もある。一方、実際の観測データから地殻の散乱強度分布を高い空間分解能で推定するには、微弱な散乱源からの散乱波エネルギーを正確に元の位置に戻し、焦点がぼけることなくイメージングする必要がある。より現実的な速度構造を導入し散乱波走時を正確に評価することによって初めてそれが可能となるさらに、等方輻射震源ではないダブルカップル型輻射震源の導入も課題の一つである。本研究では、上記の問題点を克服し、散乱強度分布のイメージングの空間分解能を向上させるために、深さ依存の速度構造やダブルカップル輻射震源をモデルに導入し、モデルから期待されるエンベロープが観測されたエンベロープを最も良く説明するような散乱係数分布を推定する新しいインバージョン法を開発した。

インバージョンのためのエンベロープモデリングにおいても、減衰の扱いを改良した。本研究では、散乱係数が大きな領域を通過する波が大きな散乱減衰を受けるように、波線にそった散乱係数の空間分布をも考慮した減衰の評価をした。減衰の評価にモデルパラメータである散乱係数を含んでおり、観測されたエンベロープから散乱係数を推定する問題は非線形インバージョン問題となる。本研究ではその解法として、非線形インバージョンを線形化して、初期モデルからモデルの反復修正をくり返すことで最終解を得る方法を採用した。また、その際に、必要に応じた拘束が選べるような定式化を行った。

第3章では、本研究で用いた合同稠密余震観測によるデータの詳細と、本研究で開発した散乱係数インバージョン法を適用するための注意すべき点を説明した。用いたデータは、82個の地震と59個の観測点との組み合わせによる計3567個のエンベロープデータである。また、2000年鳥取県西部地震とその直後に実施された合同稠密余震観測の概要についても併せて触れた。

第4章では、散乱係数インバージョン法を適用した結果と、その空間分解能について記述した。チェッカーボードレゾリューションテストの結果、2000年鳥取県西部地震の震源域周辺の深さ15kmまでは、与えたパターンが良好に再現されることが確認でき、10km程度の空間分解能を持つことが示された。また、初期モデルを変えてインバージョンを行うことにより、初期モデル依存性を調べた。その結果、推定された散乱係数の絶対値には初期モデル依存性が見られるものの、相対的な散乱係数の空間分布のパターンには、初期モデル依存性にはほとんど見られないことが確認された。

実際のデータを用いた散乱係数インバージョンの結果、いくつかの顕著な散乱係数の高異常域が見い出された。それらは、(1) 震源断層周辺の高異常域(深さ0~10km)、(2) 震源域北部の地殻中部に局在する高異常域(深さ15~20km)、(3) 大山周辺の高異常域(深さ0~25km)、である。この他に、モホ面に対応する高異常域(深さ30km)もイメージングされた。

第5章では、インバージョンの際に仮定したモデル、すなわち、震源でのダブルカップル型輻射と、一次等方散乱が成り立たない場合に、推定される散乱係数の空間分布にどのような影響があるかを数値実験により確かめた。

第6章では、実際のデータを用いた散乱係数インバージョンにより見い出された、特徴的な散乱係数の高異常域について、その不均質構造の実体を理解するために、他の研究結果との比較検討を行った。

震源断層周辺の高異常域は、深さ10kmでは震源断層に沿うように細長く分布し、断層深部に局在した不均質構造であることが推察される。震源断層直上で断層トラップ波が検出されていることから、断層

破碎帯が地下に存在している可能性がある。また、この高異常域は、深さ5 kmでは震源断層周辺をおおるように分布している。その一部は、第四紀の単成火山群や貫入岩の分布に起因した不均質構造によるものかもしれない。震源断層に沿った断面でみると、散乱係数の空間分布は一樣ではなく、散乱係数が相対的に低い領域で本震時のすべり量が大きかった領域と対応するようにみえる。これは、断層破碎帯の発達程度が場所により異なるなど、断層面の性質の違いを反映しているのかもしれない。

2000年鳥取県西部地震の震源域北部の地殻中部に局在する高異常域は、地震波の低速度域と空間的に対応すること、その低速度異常はとりわけS波に卓越すること、この付近で低周波微小地震が発生していること、浅部で第四紀火山列につながるような分布パターンをしていることなどから、深部マグマ活動に関係した高異常域である可能性がある。

大山周辺の高異常域は、地表付近からモホ面直上まで連続して分布している。また、上記の震源域北部の地殻中部に局在する高異常域と深部でつながっている。これら2つの高異常域は、大山を始めとする第四紀火山列の深部構造を反映しているかもしれない。

高異常域の詳細な分布は、本研究で開発した散乱係数インバージョン法において、より現実に近いモデルを導入したことによって明らかになったものである。このように、不均質構造イメージングツールとしての散乱係数インバージョン法の有効性を飛躍的に高めたことは、本研究の重要な成果である。また、既知の活断層の存在が知られていなかった場所で発生した、2000年鳥取県西部地震の震源断層周辺で、震源断層の不均質構造を反映すると思われる散乱係数の高異常域をイメージできたことは、一般的に困難な伏在断層の検出など、活断層の深部構造の推定に重要な指針を与えるものである。

論文審査の結果の要旨

内陸地震は、地殻中の既存の弱面でその両側が急激にずれ動くことにより発生する。このような弱面がもたらす不均質構造の空間スケールは、大きくても短周期地震波の波長と同程度であることが予想され、地下の不均質構造のイメージングに強力な武器として近年頻繁に活用されている地震波走時トモグラフィでは、その検出は困難である。波長と同程度かそれよりも短い空間スケールの地震波速度や密度のゆらぎがあれば、それは散乱体として振舞う。従って、断層破碎帯などの弱面をイメージングするには、散乱波を用いる手法が考えられる。浅野陽一提出の論文は、散乱波を用いた新たなインバージョン法を開発し、それを2000年鳥取県西部地震の余震観測データに適用することにより、震源断層及びその周辺域の短波長不均質構造を詳細にイメージングしようとするものである。

本論文では、従来の手法とは異なり、観測された地震波エンベロープにフィッティングを行って散乱係数の空間分布を推定する、新しいインバージョン手法を開発した。この手法では、従来不可能だった深さ依存の速度構造やダブルカップル輻射震源など、より実際に近いモデル空間を再現できるようになり、その結果、微弱な散乱源をも高い空間分解能でイメージングすることを可能とした。

次に、開発したインバージョン法を、2000年鳥取県西部地震の稠密余震観測で得られた多量のデータに適用することにより、震源域及びその周辺の不均質構造を推定した。その結果、震源断層に沿って分布する散乱係数の顕著な高異常域を見出した。この高異常域は、震源断層底部の深さ10km付近で特に顕著であるが、断層面に沿って面状に分布する傾向が見える。このような震源断層に沿う散乱係数の高異常域を形成する要因としては、断層破碎帯が考えられる。2000年鳥取県西部地震は、活断層の知られていない場所で発生したため、これまで様々な手法で断層面のイメージングが試みられたが、本研究で初めて断層面に対応する不均質構造の検出に成功した。これは、新たに開発したインバージョン法の威力を示すとともに、内陸地震の発生過程を理解する上で重要な成果である。

これらは、浅野陽一が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、浅野陽一提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。